

Handhabungstechnik, Montage, Werkzeugmaschinen, Messtechnik

Adaptronische Strebe zur Genauigkeitssteigerung *

Adaptronik kann Kosten halbieren und gleichzeitig die Genauigkeit steigern

J. Fleischer, C. Munzinger, W. Driess, M. Strümper, J. Wauer, C. Rudolf

Inhalt Die mechanische Steifigkeit sowie die Positioniergenauigkeit zählen zu den zentralen Beurteilungskriterien für Produktionseinrichtungen. Bisherige Lösungsansätze zur Steigerung der Positioniergenauigkeit sind meist aufwendig oder kostenintensiv. Adaptronische Denkansätze führen hier zu verbesserten Lösungen. Die Autoren beschreiben eine Technologie, die Auflösungen und Stellgenauigkeiten unterhalb von 1 µm sowie eine aktive Steifigkeitssteigerung bei günstigen Gesamtkosten verspricht.

Adaptronic strut for an accuracy increase – Adaptronics enables 50 % cost reduction combined with an increase of accuracy

Abstract The mechanical stiffness as well as the positioning accuracy are counted among the central appraisal factors for machine tools. Present approaches to increase positioning accuracy are often complex or expensive. The use of adaptronics leads to improved concepts. The authors describe a technology which promises high resolution and positioning accuracy of less than 1 µm. Further on, the adaptronic approach offers possibilities for an active stiffness control at advantageous costs.

1 Einleitung

Zu den zentralen Einflussfaktoren auf die Positioniergenauigkeit von Handhabungs- oder Montageeinrichtungen beziehungsweise auf die geometrische Genauigkeit von Werkzeugmaschinen zählen die mechanische Steifigkeit sowie die Fertigungsgenauigkeit der Komponenten, da Prozesslasten und Fehler von Komponenten, Lagerungen oder Führungen im

Betrieb Verlagerungen bewirken. Weil eine Steigerung der Herstellgenauigkeit der Komponenten in vielen Fällen entweder aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll oder technologisch nicht darstellbar ist, bietet es sich an, über eine modellbasierte Kompensation oder aber den aktiven Ausgleich durch intelligente Komponenten nachzudenken.

Modellbasierte Kompensationsansätze sind insgesamt als sehr aufwendig in der Erstellung und Umsetzung zu bewerten. Aktive Komponenten, die autonom einen Belastungs- oder Deformationszustand erfassen und eine entsprechende Ausgleichsbewegung durchführen können, bieten hier eine erhebliche Aufwandsreduktion und versprechen große Potentiale für die Zukunft. Hinsichtlich des industriellen Einsatzes muss jedoch den Kosten eine besondere Bedeutung zugemessen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei aktiven Ansätzen neben den erforderlichen Aktoren zusätzliche Messsysteme für die Zustandserfassung notwendig sind, was die Gesamtkosten negativ beeinflusst. Zusätzlich zum finanziellen Aufwand für die Messsysteme entstehen Kosten für deren Ansteuerung. Insgesamt betrachtet stehen Aufwand und Nutzen in einem ungünstigen Verhältnis. Das spricht in den meisten Fällen gegen den Einsatz aktiver Komponenten. Eine Analyse der Gesamtkosten zeigt allerdings oft, dass sich die Kosten für die Aktorik inklusive Ansteuerung gegenüber den Messtechnikkosten einschließlich Ansteuerung die Waage halten. Für den breiten industriellen Einsatz ist somit als Wunschziel abzuleiten, den Kostenfaktor „Messtechnik“ komplett zu streichen, dennoch aber eine Belastungs- beziehungsweise Deformationserfassung in Verbindung mit einer Stellbewegung darzustellen. Würde dieses Ziel erreicht, wären aktive Komponenten in breiten Anwendungsfeldern wirtschaftlich.

2 Adaptronik kann Kosten senken

Aus dem genannten Wunschziel ist sofort ersichtlich, dass eine Problemlösung mit konventionellen, etablierten Denkansätzen unwahrscheinlich ist, da ein bisher erforderlicher Systemteil eingespart werden muss, dessen technische Funktionalität aber weiterhin vorhanden sein soll. Neue Denkansätze – unter dem Oberbegriff „Adaptronik“ subsumiert – versprechen hier jedoch weitergehende Potentiale. Unter einem adaptronischen Systemansatz ist dabei ein Lösungskonzept zu verstehen, das beispielsweise unter Ausnutzung der multifunktionalen Eigenschaften neuer Werkstoffe die vier Bestandteile eines mechatronischen Systems (Sensor, Aktor, tragende Grundstruktur und Regelung) umdefiniert und funktional sowie räumlich integriert [1]. Letztlich ergibt sich aus der funktionalen Integration ein System, das die technischen Funktionalitäten des mechatronischen Systems mit weniger Systembausteinen und damit geringeren Kosten realisiert. Auch wenn das Forschungsgebiet der Adaptronik noch vergleichsweise jung ist, gibt es bereits erste umgesetzte Systeme im Bereich der Forschung und Technik [2–5]. Für die

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Dipl.-Ing. Christian Munzinger, Werner Driess, Michael Strümper
Institut für Produktionstechnik (wbk) – Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
Tel. +49 (0)721 / 608-2449, Fax +49 (0)721 / 69 91 53
E-Mail: munzinger@wbk.uka.de
Internet: www.wbk-ka.de

Prof. Dr.-Ing. Jörg Wauer, Dipl.-Ing. Christian Rudolf
Institut für Technische Mechanik (itm), Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
Tel. +49 (0)721 / 608-2397, Fax +49 (0)721 / 608-6070
Internet: www.itm.uni-karlsruhe.de

Info 1

Die Arbeiten zur adaptronischen Strebe werden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1156 „Adaptronik für Werkzeugmaschinen“ gefördert.

Info 2

* Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen „reviewten“ Fachaufsatz: Autoren-unabhängig von Experten auf diesem Fachgebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben.

eingangs dargestellte Problemstellung sind dabei Lösungskonzepte und Ideen von besonderem Interesse, welche durch eine Sensor-Aktor-Integration innerhalb eines einzigen Elements die bisher zusätzlich erforderliche Messtechnik eliminieren. Vor dem Hintergrund eines adaptiven Ansatzes gilt es zu beachten, dass für die Konzeption und Umsetzung das zu wählende Funktionsprinzip von entscheidender Bedeutung ist.

3 Adaptiver Ansatz aus dem Prinzip einer Schwingensaitenwaage

Wie bereits erwähnt, ist für eine aktive Steigerung der Positioniergenauigkeit ein System erforderlich, das den aktuellen Belastungs- beziehungsweise Deformationszustand erfasst und eine autonome Ausgleichsbewegung durchführt. Hier setzen das Institut für Produktionstechnik (wbk) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Mechanik (itm) der Universität Karlsruhe (TH) bei ihren Arbeiten an. Der Fokus der Arbeiten richtet sich auf die Erarbeitung einer Technologie für den adaptiven Ausgleich statischer und quasistatischer Positionierfehler bei Werkzeugmaschinen [6, 7]. Als Demonstrator für die Technologie dient eine Strebe für Parallelkinematiken.

Das gewählte Funktionsprinzip des adaptiven Lösungsansatzes setzt auf dem Prinzip einer Schwingensaitenwaage auf. Bei Schwingensaitenwaagen wird die Frequenzänderung einer gespannten Saite unter einer externen Laständerung als Maß für eine Kraft- beziehungsweise Längenänderung genutzt. In Verbindung mit dem Einsatz piezoelektrischer Wandler lässt sich dieses Prinzip auf die adaptive Strebe übertragen [6, 8]. Wird die Strebe in zwei Hälften geteilt, dazwischen ein piezoelektrischer Wandler platziert, über eine Saite vorgespannt und die Saite zu Schwingungen angeregt, so entsteht eine mechanische Struktur, die gleichzeitig Kräfte oder Wege messen sowie Wege stellen kann, wie **Bild 1** verdeutlicht.

Innerhalb des Konzepts kommen den multifunktionalen Eigenschaften piezoelektrischer Wandler und der darauf basierenden Sensor-Aktor-Integration besondere Bedeutung zu. Einerseits erzeugt eine extern auf einen Piezokristall aufgebrachte Last eine elektrische Spannung. Andererseits lässt sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung des Kristalls erzeugen. Innerhalb des adaptiven Systems regt die Schwingung der Saite die Strebe zu Biegeschwingungen an. Diese Biegeschwingung überträgt sich auf den Piezokristall und erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung. Wird die Strebenstruktur einer statischen beziehungsweise quasistatischen externen Last ausgesetzt, so ändert sich die Saitenspannung und damit die Frequenz der Schwingung beziehungsweise der Wechselspannung. Über das Bestimmen der Wechselspannungsfrequenz ist eine Kraftinformation direkt ableitbar und die aus der externen Last resultierenden Deformationen lassen sich durch das Anlegen einer Gleichspannung an den Piezokristall ausgleichen. **Bild 2** veranschaulicht hierzu die adaptive Sensor-Aktor-Integration.

Bei der angestrebten Sensor-Aktor-Integration ist der Möglichkeit zur Trennung des Sensorsignals vom Aktorsignal besondere Bedeutung beizumessen. Es wird ersichtlich, dass bei dem vorgestellten Ansatz sehr einfache Möglichkeiten bestehen. Wegen der variierenden Frequenzbereiche der beiden

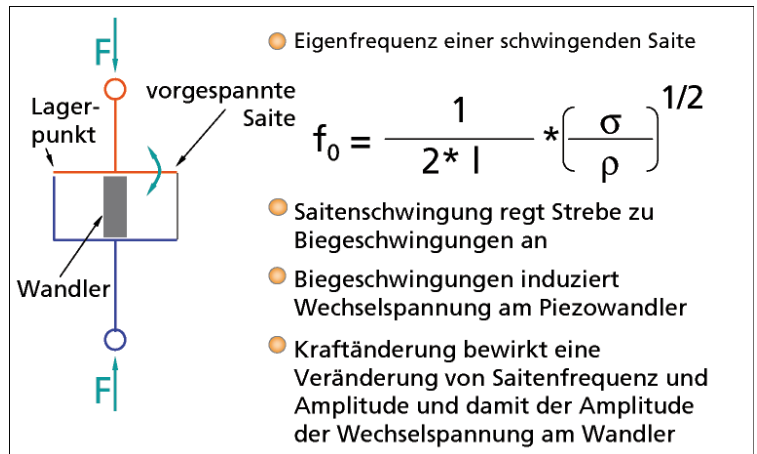


Bild 1. Konzept der adaptiven Strebe

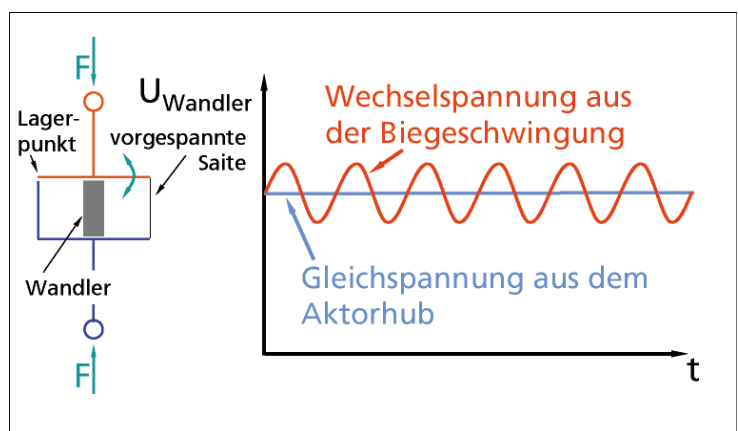


Bild 2. Sensor-Aktor-Integration

Signalanteile kann die Trennung technisch über einen Hochpass oder einen Resonanzfilter umgesetzt werden. An dieser Stelle zeigt sich, dass die adaptive Strebe nicht nur für statische und quasistatische Anwendungsfälle nutzbar ist. Unter Ausnutzung eines abgestimmten Resonanzfilters können mit Hilfe des analogen Wechselspannungssignals beziehungsweise der analogen Wechselspannungsänderung auch dynamische externe Lasten erfasst und ausgeglichen werden. Aus diesem Sachverhalt resultieren breite technologische Anwendungsmöglichkeiten des erläuterten Konzepts.

4 Technologische und wirtschaftliche Potentiale

Auch wenn die vorgestellte Technologie der adaptiven Strebe am Beispiel einer Werkzeugmaschine erarbeitet wird, kann das System darüber hinaus praktisch uneingeschränkt für serielle oder parallele Kinematikstrukturen im Bereich der Handhabung, Montage oder im Werkzeugmaschinenbau genutzt werden. In Bezug auf die konkreten technischen Potentiale ist zunächst der Ausgleich von statischen und quasistatischen Lasten mit piezoelektrischen Wandlern zu nennen. Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass aufgrund der Transformation von externen statischen Lasten in dynamische Lasten für den piezoelektrischen Wandler die darstellbare Zeitkonstante der Strebe unabhängig vom Werkstoff des Wandlers und der Ansteuerung ist. Die physikalisch be-

dingten, begrenzten Zeitkonstanten piezoelektrischer Werkstoffe werden elegant umgangen.

Zusätzlich dazu wird das System über die schwingende Saite in einem geschlossenen Regelkreis betrieben. Dies erlaubt die vereinfachte Auslegung des Wandlers über linearisierte Gleichungen. Für den Betrieb des Systems sind in erster Näherung keine aufwendigen Drift- oder Hysteresekompensationen erforderlich. Darüber hinaus bietet die Technologie das Potential, die erste Eigenfrequenz um bis zu einem Faktor vier gegenüber einer passiven Strebenstruktur anzuheben. Speziell dieser Sachverhalt macht die Technologie für die Konzeption von verbesserten Handhabungs- und Montageeinrichtungen interessant, da insgesamt das statische, quasistatische und dynamische Verhalten verbessert werden kann.

Neben den rein technologischen Potentialen verdienen die wirtschaftlichen Potentiale des Ansatzes eine besondere Herausstellung. Da piezoelektrische Wandler in Stapelbauform prinzipbedingt nur kleine Zugkräfte aufnehmen können, werden sie im realen Einsatz praktisch immer über einen Mechanismus vorgespannt. Im Falle des erläuterten Ansatzes übernimmt die schwingende Saite neben der Funktion der Maßverkörperung die Funktion der Vorspannung. Die schwingende Saite stellt somit keinen zusätzlichen konstruktiven Aufwand dar und erlaubt die vollständige Ausschöpfung des wirtschaftlichen Einsparpotentials aus der Eliminierung der bisher zusätzlich erforderlichen Messtechnik. Insgesamt ist die vorgestellte Technologie damit in zweierlei Hinsicht als „adaptronisch“ zu bewerten. Zunächst wird die Vorspannung, die ein tragendes Teil der Grundstruktur ist, gleichzeitig als Maßverkörperung genutzt. Darüber hinaus kommt der piezoelektrische Wandler gleichzeitig als Sensor und als Aktor zum Einsatz.

5 Prototypische Umsetzung

Auf dem erläuterten Funktionsprinzip aufbauend wurde eine erste prototypische Realisierung einer adaptronischen Strebe am Institut für Produktionstechnik (wbk) umgesetzt. Ausgehend von ersten Dimensionierungen zeigte sich, dass für eine ausreichende Kraft- beziehungsweise Wegauflösung der Strebe eine möglichst hohe Saitenfrequenz erreicht werden muss. Die rechnerische Frequenz für eine Auflösung von mindestens $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ergab sich dabei zu etwa 2000 Hz. Unter Berücksichtigung einer externen Last von $\pm 2000 \text{ N}$ beziehungsweise einem Stellweg von $\pm 20 \mu\text{m}$ für den Ausgleich von Komponentenfehlern wurde ein rechnerisches Frequenzband von 1500 Hz bis 2500 Hz für den Betrieb der Strebe ermittelt. Einerseits zeigt die hohe Betriebsfrequenz klar auf, dass eine Maschinenstruktur oder eine Handhabungseinrichtung nicht negativ durch die Biegeschwingung der Strebe beeinflusst wird. Andererseits ist aber auch sofort eine der Herausforderungen für die Umsetzung des sonst sehr einfach anmutenden Systems zu erkennen. Da die erste Eigenfrequenz einer passiven Strebe deutlich unterhalb von 500 Hz liegt, muss die adaptronische Strebe so gestaltet werden, dass trotz der hohen Betriebsfrequenz noch ein sicheres Erfassen der Vorspannungsschwingung durch den piezoelektrischen Wandler gewährleistet ist. Aus diesem Grund wurde bei der Konstruktion auf die Verminderung der Schnittstellenzahl und eine Stick-Slip-freie Kopplung der Strebenteile geachtet (Bild 3).

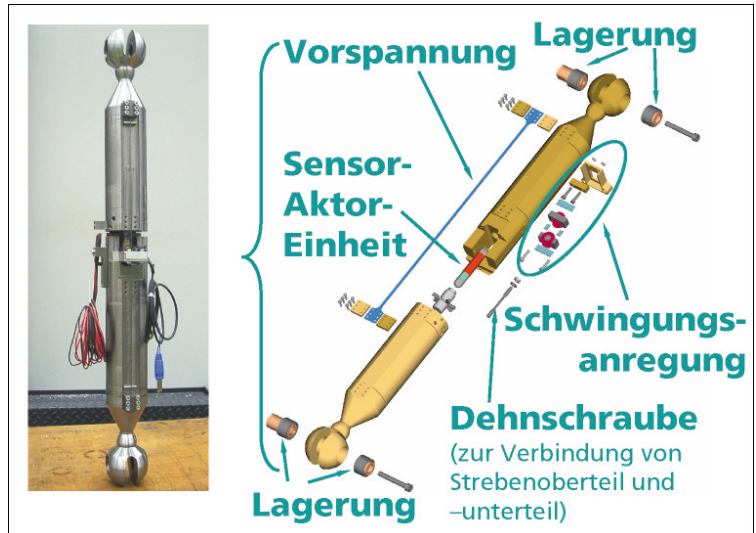


Bild 3. Gefertigter Prototyp und Explosionsdarstellung der Strebe

Die Gesamtstruktur besteht dabei aus einem Ober- und einem Unterteil, die über eine Dehnschraube miteinander verbunden sind. Die Vorspannung ist als einfacher Blechstreifen konzipiert, um eine möglichst geringe Biegesteifigkeit zu erzielen. Zusätzlich dazu wurde der piezoelektrische Wandler momentenfrei koaxial zur Strebenlängsachse an das Strebenober- und -unterteil angebunden. Um die Inbetriebnahme zu vereinfachen sowie zur Erarbeitung der erforderlichen Regelungstechnik, ist der Gesamtwandler als zweiteiliger Piezostack konzipiert. Damit bietet sich die Möglichkeit, das sensorische und aktorische Verhalten zunächst getrennt zu untersuchen und erst im Verlauf der Arbeiten zu integrieren. Neben den bisher genannten Komponenten ist für das Funktionsprinzip der Strebe zusätzlich noch eine Schwingungsanregung erforderlich. Aus Kostengründen sowie aufgrund der komfortablen Steuer- beziehungsweise Regelbarkeit wurde für die prototypische Realisierung auf einen einfachen Elektromagneten zurückgegriffen.

5 Regelungstechnik

Parallel zur konstruktiven Ausarbeitung wurde eine Analyse des Gesamtsystems unter regelungstechnischen Gesichtspunkten durchgeführt. Dabei lassen sich drei zentrale Aufgaben identifizieren.

Zunächst muss die Saite beziehungsweise Vorspannung zu Schwingungen angeregt und über den gesamten Wandlerhub stabil in der Schwingung gehalten werden.

Die zweite zentrale Aufgabe bei der Entwicklung der Regelungstechnik ist im Bestimmen der Saitenschwingungsfrequenz zu sehen. Die wesentliche Herausforderung besteht dabei in der Identifikation eines Lösungsprinzips, das eine hohe Abstrakte und damit eine gute Regeldynamik gestattet.

Parallel dazu ist der eigentliche Regler für die aktuatorische Stellbewegung zu konzipieren. Da die Maßverkörperung in Form einer schwingenden Saite den Betrieb des Systems in einem geschlossenen Regelkreis ermöglicht, kann im ersten Ansatz für die Regelung der Stellbewegung ein konventioneller PI-Regler mit Sollwertaufschaltung genutzt werden. Zur Schwingungsanregung der Saite bietet sich aus Gründen der Stabilität das Ausnutzen einer Rückkopplung an. In Analogie

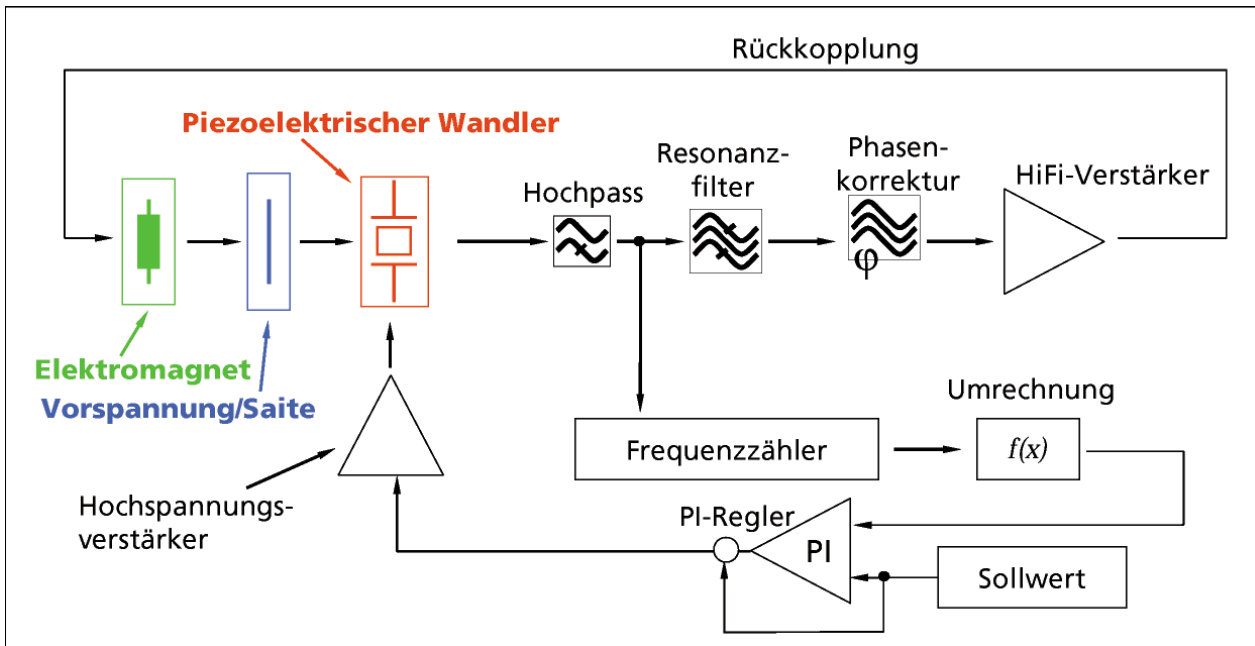


Bild 4. Schematische Darstellung des Gesamtreglers

zu Rückkopplungseffekten im Audibereich kann das am piezoelektrischen Wandler erfasste Sensorsignal nach der Filterung sowie dem Ausgleich von Phasenverschiebungen und Interferenz-Erscheinungen über einen kommerziell erhältlichen HiFi-Verstärker direkt auf die elektromagnetische Anregung der Saite zurück gekoppelt werden.

Einer der Vorteile dieses Lösungsansatzes ist in der genannten Stabilität der Anregung zu sehen. Da Rückkopplungen durch Impulse angeregt werden können, nehmen prinzipbedingt auch massive externe Störungen praktisch keinen Einfluss mehr auf die Schwingung der Vorspannung. Zusätzlich wird eine stabile Resonanzschwingung der Saite in ihrer tiefsten Eigenfrequenz angeregt. Das schlägt sich in den später erläuterten messtechnischen Untersuchungen in einer automatischen Maximierung des Sensorsignals nieder.

Im letzten Schritt der Reglerentwicklung wurden verschiedene Möglichkeiten zur Frequenzbestimmung untersucht. Da das Bestimmen der Periodendauer in Verbindung mit einer möglichen Frequenzmodulierung des Sensorsignals die größten Potentiale hinsichtlich Abtastrate, Ansprechzeit und Genauigkeit verspricht, wurden hierzu entsprechende Strukturen ausgearbeitet und in der Gesamtregerstruktur implementiert. **Bild 4** verdeutlicht die erläuterte Gesamtregerstruktur in einer schematischen Darstellung.

6 Messtechnische Untersuchung

Mit der umgesetzten Reglerstruktur und dem gefertigten Prototypen der Strebe konnten bereits Messungen zur Validierung des Ansatzes durchgeführt werden. Im Rahmen eines iterativen Prozesses aus Versuchsdurchführung, Reglerentwicklung und mechanischer Abstimmung des Gesamtsystems wurde nachgewiesen, dass die Strebenstruktur funktionsfähig ist. Die durchgeführten Versuche ergaben ein am piezoelektrischen Wandler detektierbares Frequenzband von etwa 2340 Hz bis 2520 Hz. Im Rahmen der durchgeführten Optimierungen war es möglich, bei ausreichender Stabilität des

Sensorsignals eine Abtastrate von zirka 500 Hz zu erzielen. In Bezug auf die erreichte Stellgenauigkeit zeigte sich in den bisherigen Versuchen das zur Validierung genutzte externe Messsystem mit einer Auflösung von 0,5 µm als begrenzender Faktor. Deswegen ist die derzeit erzielbare Genauigkeit der adaptronischen Strebe mit mindestens ±0,5 µm zu beziffern.

Wie aus den in **Bild 5** dargestellten Messergebnissen ersichtlich ist, verspricht die Technologie der adaptronischen Strebe hier jedoch noch eine Verbesserung auf weniger als ±0,25 µm. Die mit dem aktuellen Entwicklungsstand der Strebe erreichbare Wiederholbarkeit ist aus den gleichen Gründen wie bei der Stellgenauigkeit momentan mit ±0,5 µm zu benennen. Auch hier werden sich erst nach dem Austausch des externen Messsystems weitergehende Aussagen ableiten lassen.

In Bezug auf die Dynamik der Strebe bleibt zu bemerken, dass die derzeit erreichbaren Nachstellzeiten noch auf rund 500 ms begrenzt sind. Der Grund für diese Begrenzung ist in der momentan noch gewählten Sensor-Aktor-Aufteilung zu sehen. Aus Gründen der Unfallsicherheit und Reglerentwicklung sind die Sensor- und die Aktorfunktion derzeit zwar räumlich integriert, aber noch funktional getrennt. Unter Berücksichtigung der mechanischen Reihenschaltung und der Aufteilung von 33 % sensorisch genutztem zu 66 % aktorisch genutztem Wandlerteil, führt der jetzige Betrieb zu einer noch unzulänglichen mechanischen Steifigkeit innerhalb des Regelkreises. Das begrenzt letztlich die erzielbare Dynamik. Sobald im Verlauf weiterer Arbeiten der Wandler sensorisch-aktorisch integriert genutzt wird, ist auch hier noch eine deutliche Steigerung zu erwarten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der aktive Ausgleich von Ungenauigkeiten in der Positionierung bietet große Potentiale, die Genauigkeit von Handhabungs- und Montageeinrichtungen oder auch Werkzeugmaschinen zu steigern. Bisher konnten sich derartige Ansätze

aus Kostengründen nicht etablieren. Adaptronische Systeme bieten hier aufgrund der Möglichkeit zur funktionalen Integration einzelner Komponenten erhebliche Potentiale, technische Funktionen bei vergleichsweise günstigen Kosten zu etablieren. Das Institut für Produktionstechnik (wbk) beschäftigt sich vor diesem Hintergrund in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Mechanik (itm) mit Möglichkeiten zum adaptronischen Ausgleich geometrischer Komponentenfehler und zu Verlagerungen aus Prozesslasten. Am Beispiel einer Strebe für Parallelkinematiken wurde eine Technologie erarbeitet, welche über die Ausnutzung einer Maßverkörperung in Form einer schwingenden Saite eine adaptronische Kompensation ermöglicht. Neben den aus der Einsparung zusätzlicher Messtechnik resultierenden, günstigen Gesamtkosten der Technologie, bietet der Ansatz weitere Vorteile, beispielsweise eine einfache Auslegung oder den Betrieb im geschlossenen Regelkreis. Die messtechnische Untersuchung der prototypischen Umsetzung zeigt momentan schon Stellgenauigkeiten und Wiederholbarkeiten besser als $\pm 0,5 \mu\text{m}$, Abtastraten von etwa 500 Hz und Nachstellzeiten weniger als 500 ms. Im Zuge der weiteren Entwicklung ist prinzipiell noch eine weitere

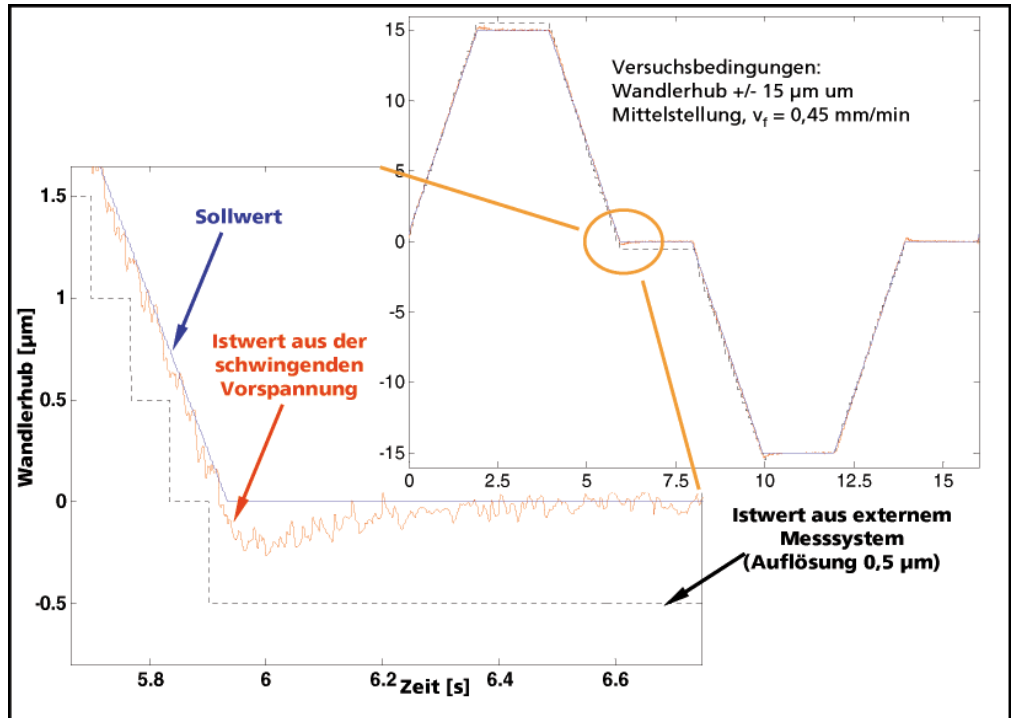


Bild 5. Messergebnisse zur Lageregelung der Strebe über die schwingende Vorspannung

Steigerung der Stellgenauigkeit erreichbar. Aufgrund der Anforderungen für den industriellen Einsatz der Technologie werden die weiteren Arbeiten jedoch eher auf die Steigerung der Dynamik und die Adaption der Technologie in andere Anwendungsbereiche gerichtet werden.

Literatur

[1] Denkena B.; Hesse, P., Götz, T.; Harms, A.; Schnebeck, T.: Adaptronische Systeme im Maschinenbau. VDI-Z 146 (2004) H. 4, S. 25 ff.

[2] Homann, S.; Rose, M.; Breitbach, E.: Hybride elektromechanische Netzwerke mit piezoelektrischen Wandlern. Konferenzbericht, Adaptronic Congress 2005, Göttingen

[3] Jendritza, D. J.: Adaptronik. F+M, Feinwerktechnik, Mikroelektronik, Mikroelektronik (1996) Band 104, S. 192 ff.

[4] Jendritza, D. J.: Aktive Schwingungsdämpfung mit smarten piezoelektrischen Festkörperaktoren. Konferenzbericht, Proceedings of the 2d Conference Smart Mechanical Systems – Adaptronics, Magdeburg, 1997, S. 11 ff.

[5] Neugebauer, R.; Drossel, W.-G.; Roscher, H.-J.; Wittstock, V.; Kranz, B.; Kunze, H.: Adaptronische Komponenten für Parallelkinematiken. Konferenzbericht, Adaptronic Congress 2004, Hildesheim

[6] Fleischer, J.; Munzinger, C.: Aktiver Ausgleich durch Adaptronik. Werkstatt und Betrieb 138 (2005) H. 4, S. 31 ff

[7] Rudolf, C.; Wauer, J.; Fleischer, J.; Munzinger, C.: An Approach For Compensation Of Geometric Faults In Machine Tools. Angenommene Veröffentlichung im Rahmen der IDETC/CIE 2005, Dynamics and Optimization of Parallel Mechanisms and Robots

[8] Fleischer, J.; Munzinger, C.; Knödel, A.; Wauer, J.; Rudolf, C.: Ansätze zur adaptronischen Kompensation geometrischer Maschinenfehler. Konferenzbericht, Adaptronic Congress 2005, Göttingen